

PENGIDENTIFIKASIAN ENTALPI BAHAN BAKAR PADAT (*CHAR*) DAN CAIR (*TAR*) HASIL PROSES PIROLISIS BIOMASA

Widya Wijayanti

Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jl. MT Haryono 167 Malang, 65145; widya_dinata@ub.ac.id

ABSTRACT

An experimental study of pyrolysis method had been conducted to support alternative fuels demand. It was very attractive method to convert the biomass; mahogany wood to be the alternative fuels. For that reason, an appropriate pyrolyzer will be required to support the process. Due to thermochemical process, an occurred energy transfer all through the process considered not only the heat transfer mechanism but also the chemical reaction mechanism producing heat of reaction in the pyrolysis products (enthalpy). Therefore, the study aims to identify the influence of different temperatures on the measured enthalpy of pyrolysis by means of calorimetric measurement. The biomass samples used mahogany wood that would be pyrolyzed in the experimental run. Afterward, the influence of temperature toward the solid (char) and liquid (tar) yields were investigated. The enthalpy yields formation would be presented by calorific/heating value of formed char/solid yields indicating important-physical properties of fuel. The results referred that the values of solid yield enthalpy were pointed in the increasing values with the increasing of pyrolysis temperature, however, the enthalpy values of tar inclined to temperature of 500 °C. It would decline because the viscosity of tar becomes lighter.

Keywords: *Enthalpy, Char, Tar, Biomass, Pyrolysis*

PENDAHULUAN

Pirolisis merupakan proses dekomposisi termal dimana oksidatornya adalah berupa gas inert, N_2 [1]. Dalam prosesnya, bahan baku (*feedstock*) yang akan dikonversi menjadi bahan bakar alternatif nanti berasal dari sumber daya yang terbarukan seperti *biomass*. Dari penelitian yang sudah dilakukan, *biomass* dapat dikonversi dalam bentuk bahan bakar padat (arang/*char*), bahan bakar cair (*tar*), dan bahan bakar gas (CH_4 dan H_2) [4].

Untuk pengkonversian bahan bakar dengan pirolisis ini dibutuhkan peralatan berupa *gasifier* yang tangguh, efektif dan efisien. Dalam pengoperasiannya nanti, harus diketahui temperatur optimum dan waktu operasional selama proses agar tidak terjadi pemborosan energi. Apalagi, pirolisis merupakan *precursor* gasifikasi, sehingga sangat diharapkan jika arang (*char*) dan *bio-oil* yang dihasilkan dapat digunakan kembali untuk pemanasan *furnace* kembali. Oleh karena itu, rancangan untuk pembuatan *gasifier* yang baik harus mempertimbangkan transfer energi dalam hal ini transfer panas yang diberikan oleh *heater* pada *furnace* yang kemudian digunakan untuk memanaskan biomasa pada *furnace bed*.

Tidak hanya dilihat dari sudut pandang transfer panas, perancangan piroliser maupun *gasifier* juga harus dilihat dari sudut pandang transfer massa dimana di dalam piroliser itu sendiri akan terjadi reaksi kimia yang mampu mengubah bahan baku (biomasa) menjadi 3 wujud bahan bakar; bahan bakar padat, cair, dan gas. Sehingga, pada aplikasinya nanti, perancangan piroliser harus memperhatikan 2 hal, yaitu dari sisi perpindahan panas dan reaksi kimianya.

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} = \frac{1}{r} \left(\lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + (-\Delta H) \left(-\frac{\partial p}{\partial t} \right) \quad (1)$$

Untuk mengetahui tentang transfer energi pada proses pirolisis, berbagai penelitian tentang pirolisis ini telah dilakukan, baik dari sisi perpindahan panas, perpindahan masa yang melibatkan reaksi kimia, serta dari kedua sisi tersebut [1, 2, 3, 8]. Penelitian-penelitian yang sudah dilakukan [2-7] mengasumsikan bahwa perpindahan panas yang terjadi pada pirolisis murni terjadi secara konduksi. Hasil penelitian menunjukkan adanya penyimpangan hasil pada distribusi temperaturnya. Ternyata, setelah dilakukan penelitian lanjutan, hasil penyimpangan penelitian tersebut ditunjukkan karena pada pirolisis, transfer energi terjadi tidak hanya dengan melibatkan transfer panas saja, namun juga dipengaruhi oleh faktor lain seperti penurunan volume biomasa selama proses [6, 7]. Dengan alasan tersebut, efek dari penurunan volume selama proses ikut dipertimbangkan dalam penyelesaian persamaan transfer energi. Tidak hanya dari sudut pandang transfer energi, penelitian yang lain [2, 3] juga memodelkan perubahan densitas biomasa sebagai akibat dari perubahan reaksi kimia. Alasan ini dikemukakan karena reaksi kimia akan mempengaruhi transfer masa serta laju kecepatan reaksi selama proses, sehingga besarnya perubahan densitas yang akan mempengaruhi laju kecepatan reaksi tersebut turut dipertimbangkan dalam penyelesaian persamaan transfer energi pada persamaan 1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan mempertimbangan reaksi kimia, maka besarnya proses transport yang terjadi selama proses pirolisis dapat diprediksi/dihitung.

Sayangnya, dari penelitian-penelitian yang sudah dikemukakan, dalam mempertimbangkan transfer masa pada reaksi kimia tersebut, belum diketahui berapa nilai entalpi (ΔH)/panas reaksi sesungguhnya yang dihasilkan selama pirolisis. Pemberian nilai entalpi sebesar -255 kJ/kg [2] dan -400 kJ/kg [7] hanya berdasarkan *trial and error* pada simulasi numerik untuk memvalidasi distribusi temperatur yang terjadi selama pirolisis. Hal ini dilakukan hanya dengan alasan untuk mengetahui apakah transport energi dan massa yang terjadi selama proses benar-benar dipengaruhi oleh perpindahan panas konduksi dan reaksi kimianya. Selain itu, hasil simulasi numerik belum menunjukkan kesesuaian hasil eksperimen pada proses pirolisis. Masih ada penyimpangan hasil baik dari sisi perpindahan panasnya maupun reaksi kimianya [11]. Berawal dari latar belakang yang telah dikemukakan di atas, maka perlu dilakukan pengidentifikasian nilai entalpi yang sesungguhnya.

Untuk mengukur berapa besar nilai entalpi yang sesungguhnya harus dilakukan pengukuran entalpi secara eksperimen yang tidak mudah. Hal ini membutuhkan metode yang membutuhkan waktu penelitian yang relatif panjang. Hal ini dikarenakan, pada proses pirolisis, transfer massa terjadi dari bentuk padat ke bentuk padat, cair, dan gas, sehingga harus dilakukan pengamatan/pengukuran entalpi pada masing-masing jenis produk bahan bakar hasil pirolisis. Selain pengamatan yang dilakukan pada tiap jenis bahan bakar, entalpi yang dihasilkan selama proses juga bukan merupakan variabel konstan, namun entalpi merupakan variabel yang terikat dengan temperatur. Entalpi produk hasil pirolisis sebenarnya tidak bisa diasumsikan mempunyai nilai konstan, karena selama proses pirolisis, dekomposisi termal terjadi tidak hanya secara endotermik tetapi juga secara ekstoremik [4]. Sehingga, entalpi berubah secara drastis dari positif (melepas panas) dan negatif (menyerap panas). Oleh karena itu, maka pengaruh temperatur pirolisis terhadap pembentukan produk juga harus diamati.

Untuk itu, perlu dilakukan pengidentifikasian berapa sebenarnya besar entalpi atau perubahan entalpi yang dihasilkan selama proses yang mengikuti fungsi temperatur pirolisis tersebut. Pengukuran entalpi dilakukan dengan mengukur panas reaksi yang dihasilkan oleh bahan bakar padat dan cair yang dipengaruhi oleh temperatur pirolisisnya. Entalpi yang dihasilkan pada ketiga jenis bahan bakar alternatif tersebut akan digunakan untuk menyelesaikan persamaan 1, sehingga nilai entalpi yang sesungguhnya pada transfer panas/energi dan transfer masa berupa reaksi kimia dapat diketahui.

METODOLOGI PENELITIAN

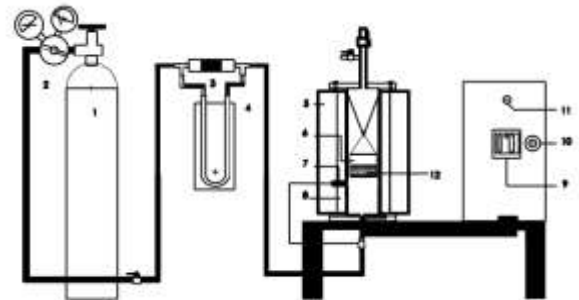
Penelitian ini meliputi beberapa tahap penelitian, yaitu melakukan proses pirolisis, kemudian mengukur produk pirolisis yang berupa *char* (produk padat) dan tar (produk cair), dan setelah itu mengukur entalpi *char* dan tar pada bomb calorimeter.

Sebelum proses pirolisis dimulai, mula-mula biomasa dibuat dalam bentuk partikel dengan ukuran sekitar $1 \mu\text{m}$ dan dikeringkan pada suhu 100°C selama kurang lebih 1 jam. Kemudian kadar air pada penelitian ini

di uji dengan moisture analyzer hingga sekitar 4%. Hal ini dilakukan agar biomasa sudah dalam kondisi kering, sehingga tar tidak banyak bercampur dengan air untuk hasil pirolisisnya nanti. Selain itu, hal ini ditujukan agar air diluar partikel biomasa sudah tidak terikat dengan partikel biomasa. Setelah proses pengeringan selesai, spesimen ditimbang sebesar 200 gram untuk tiap pengujian.

Selanjutnya, biomasa yang dimasukkan dalam gelas ukur tadi dimasukkan ke dalam ruang pemanas piroliser (*furnace*). Gas N_2 dialirkan ke dalam *furnace* sampai kadar $\text{O}_2 \pm 2\%$ dari volume ruang pemanas. Agar piroliser dapat bekerja dan memberikan hasil sesuai yang diharapkan, terlebih dahulu *thermocontrol* diatur untuk variasi pertama dengan temperatur 250°C dan laju pemanasan $0,44^\circ\text{C/detik}$. Setelah itu, piroliser dinyalakan dan juga katup keluar dibuka sedikit supaya O_2 dapat tedorong keluar karena gas N_2 yang memenuhi tabung. Proses pirolisis dibiarkan berjalan selama 3 jam.

Setelah proses pirolisis selesai, piroliser dimatikan dan padatan hasil pirolisis yang telah terbentuk dikeluarkan. Kemudian berat dan volume padatan hasil pirolisis tersebut diukur. Langkah-langkah tersebut dilakukan untuk semua variasi temperatur, dari 250°C – 800°C .



Gambar 1. Skema alat penelitian untuk proses pirolisis char dan tar

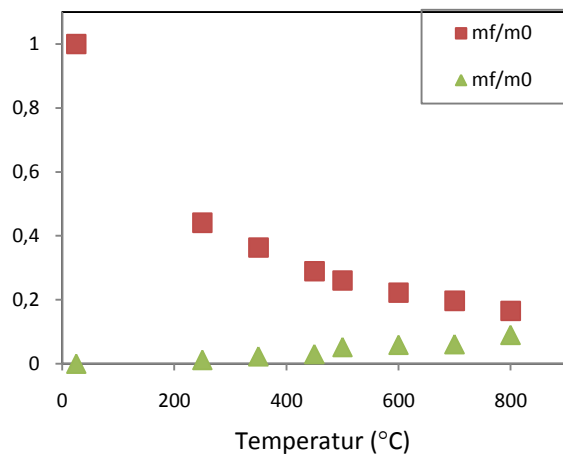
Selanjutnya, *char* hasil pirolisis diuji nilai kalornya untuk mengetahui besarnya entalpi pada masing-masing temperatur pirolisis.

Secara parallel pula, tar yang dihasilkan ditangkap dengan cara dikondensasikan ke dalam air es yang didalamnya berisi tabung reaksi. Kemudian setelah proses selesai, tabung-tabung tersebut ditimbang untuk mengetahui massa tar yang dihasilkan. Pada proses penangkapan tar ini, bio-oil yang diinginkan untuk bahan bakar cair masih terjebak dengan air. Oleh karena itu perlu dilakukan proses pemurnian bio-oil. Setelah bio-oil berhasil dimurnikan, maka bio-oil tersebut diuji nilai kalornya untuk diketahui entalpinya. Pengujian nilai kalor/entalpi/panas reaksi bahan bakar padat dan cair yang dihasilkan diuji dengan menggunakan bomb calorimeter.

HASIL DAN PEMBAHASAN

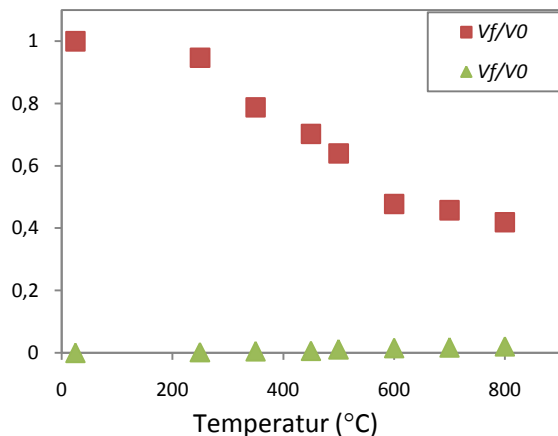
Dari penelitian ini dihasilkannilai kalor bahan bakar yang merupakan salah satu nilai *properties* untuk menyelesaikan persamaan energi pada proses pirolisis. Nilai kalor pada proses pengukuran nanti adalah sama

dengan entalpi (panas reaksi) selama proses pirolisis. Meskipun satu titik data diambil pada satu temperatur pirolisis dengan proses selama 3 jam, namun hasil penelitian secara keseluruhan menerangkan bahwa perubahan-perubahan yang terjadi adalah perubahan selama pirolisis dimulai dari $T=25^{\circ}\text{C}$ (sebelum proses pirolisis dimulai) hingga $T=800^{\circ}\text{C}$. Adapun entalpi yang terukur adalah nilai entalpi *char* dan entalpi tar (*bio-oil*), sedangkan entalpi gas akan diukur/dihitung pada penelitian selanjutnya.



Gambar 2. Massa *char* dan *tar* hasil pirolisis pada temperatur pirolisis $250^{\circ}\text{C} - 800^{\circ}\text{C}$

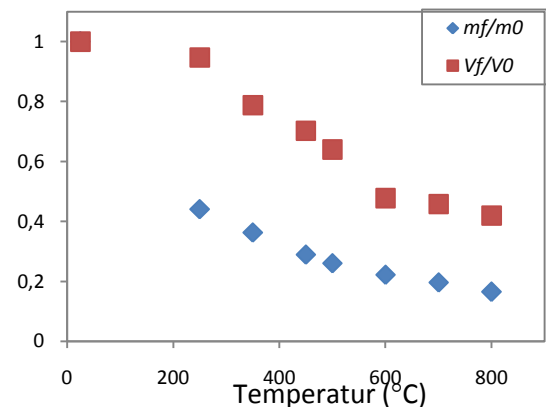
Oleh karena pirolisis merupakan proses termokimia, maka sebelum menuju ke perolehan nilai entalpi hasil proses pirolisis, maka pengaruh temperatur yang merupakan faktor penting pemanasan proses, yang sangat mempengaruhi produk akhir pirolisis nanti akan dianalisa terlebih dahulu. Oleh karena itu, sebelum diperoleh nilai entalpi yang terukur, maka pengaruh temperatur pada akhir produk akan diamati terlebih dahulu. Pengamatannya dilakukan dengan mengukur *massa* (m) dan *volume* (V) yang terbentuk pada akhir proses. Dalam hal ini, massa akhir dilambangkan dengan bilangan non dimensional yang menunjukkan perbandingan *massa* akhir (m_f) dengan *massa* awal biomassa (m_0). Hal ini berlaku juga untuk volumenya (V_f dan V_0).



Gambar 3. Volume *char* dan *tar* hasil pirolisis pada temperatur pirolisis $250^{\circ}\text{C} - 800^{\circ}\text{C}$

Efek temperatur pada produk pirolisis Masa dan volume produk pirolisis

Proses pirolisis kali ini dilakukan dengan menggunakan laju pemanasan rendah (*slow* pirolisis) dengan laju pemanasan sebesar $0,44^{\circ}\text{C}/\text{detik}$. Karena laju pemanasannya tergolong rendah, maka produk yang terbentuk sebagian besar adalah *char*. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2 dan 3. Pada grafik tersebut, dapat dilihat bahwa massa dan volume *char* mempunyai prosentase produk yang lebih besar dibandingkan dengan massa dan volume tar. Data tersebut menunjukkan bahwa masa produk pirolisis menghasilkan 40% *char* dan 2% *tar* untuk temperatur rendah, 26% *char* dan 5% *tar* untuk temperatur pirolisis sedang dan 16% *char* dan 9% *tar* untuk temperatur pirolisis yang tinggi. Sedangkan produk *char* terendah dihasilkan pada temperatur tertinggi yaitu $T=800^{\circ}\text{C}$ yang diiringi dengan peningkatan produk tar. Dapat dikatakan bahwa semakin tinggi temperatur, maka *char* yang dihasilkan semakin sedikit, sebaliknya *tar* yang dihasilkan akan semakin banyak. Sehingga, hasil proses pirolisis menunjukkan perbandingan terbalik antara produk yang berbentuk padat dengan produk yang berbentuk cair (*tar*). Hal ini dikarenakan dengan semakin besarnya temperatur pirolisis, maka komponen/senyawa yang ada di dalam serbuk kayu mahoni akan semakin banyak yang terdekomposisi. Dekomposisi biomassa yang terjadi ini akan menyebabkan mengecilnya partikel-partikel kayu akibat menguapnya uap air dan *volatile matter*. *Volatile matter* ini pada kondisi atmosfer nanti akan menghasilkan tar (cair) dan gas (yang akan diamati pada penelitian berikutnya).

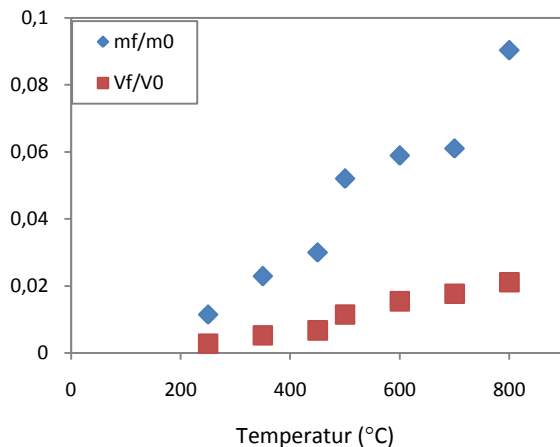


Gambar 4. Massa dan volume *char* hasil pirolisis pada temperatur pirolisis $250^{\circ}\text{C} - 800^{\circ}\text{C}$

Oleh karena itu, dengan semakin banyaknya komponen yang terdekomposisi, maka massa biomassa yang berwujud *char* semakin kecil *massatar* yang dihasilkan akan meningkat.

Selain itu, komponen utama dari serbuk kayu mahoni meliputi selulosa, hemiselulosa dan lignin. Dari penelitian terdahulu dapat dilihat bahwa prosentase kandungan biomassa adalah dari selulosa, hemiselulosa dan

lignin. Serbuk kayu mahoni merupakan jenis kayu keras (*hardwood*) dimana hemiselulosa mempunyai kandungan yang paling besar. Selulosa adalah senyawa tercepat dalam proses dekomposisi pada suhu rendah, sedangkan lignin adalah senyawa yang paling lambat proses dekomposisinya dan berlangsung pada suhu yang tinggi. Adapun hemiselulosa merupakan komponen yang akan terdekomposisi pada temperatur pirolisis 200°C-280°C. Dari gambar 2 dan 3 dapat dilihat bahwa dekomposisi yang ditandai dengan penurunan masa biomasa paling signifikan terjadi pada suhu 250°C - 450°C. Hal ini dikarenakan ketiga senyawa terdekomposisi secara simultan, sehingga menyebabkan penguraian senyawa bersama antara selulosa, hemiselulosa, dan lignin.

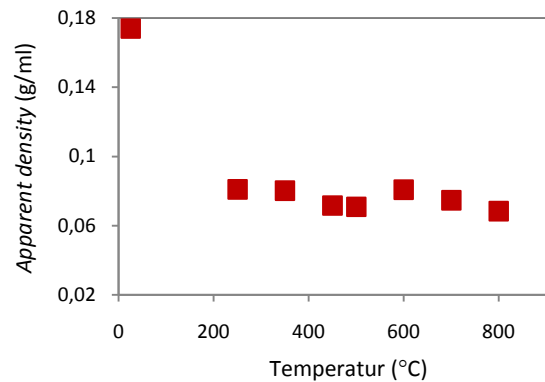


Gambar 5. *Massa dan volume tar* hasil pirolisis pada temperatur pirolisis 250°C – 800°C

Peningkatan masa dan volume *tar* dimulai pada temperatur 450°C, Hal ini karena hemiselulosa dan selulosa sudah mengalami dekomposisi menyeluruh, sedangkan lignin masih sebagian namun lebih banyak dibandingkan pada temperatur sebelumnya yang menyebabkan jumlah *massa tar* yang dihasilkan pada titik 450°C lebih banyak.

Pengaruh *massa* dan *volume* produk pada densitas produk

Selanjutnya, besar *massa* dan *volume* pada masing-masing produk *char* dan *tar* akan dibandingkan seperti terlihat pada gambar 4 dan 5 untuk melihat densitas produk *char* dan *tar* yang dihasilkan, yang dapat dilihat pada gambar 6 dan 7.

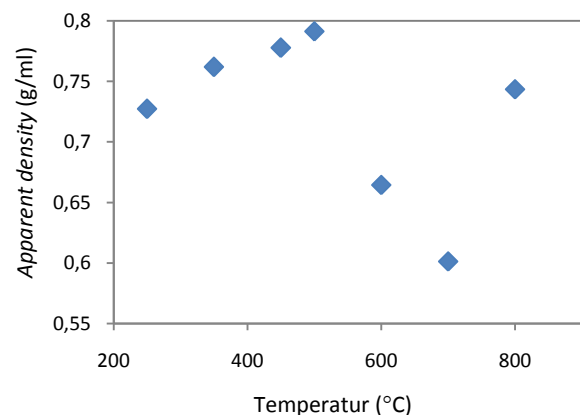


Gambar 6 Densitas *char* hasil pirolisis pada temperatur pirolisis 250°C – 800°C

Densitas *char*

Pada gambar 4 dapat dilihat bahwa perbandingan *massa* dan *volume char* yang terjadi cenderung menghasilkan perbandingan yang sama. Dengan kata lain dapat dikatakan bahwa densitas yang terjadi selama pirolisis untuk produk padat adalah tetap, mempunyai nilai konstan.

Bila dibandingkan dengan penelitian sebelumnya [6] yang menyatakan perubahan signifikan densitas terjadi pada suhu pirolisis 450°C, maka hal ini tidak terlihat pada penelitian ini. Hal ini disebabkan besarnya laju pemanasan pirolisis yang tidak sama antara penelitian terdahulu dengan penelitian ini, dimana penelitian terdahulu mempunyai laju pemanasan 0,11°C/detik, sedangkan pada penelitian ini sebesar 0,44°C/detik yang menyebabkan dekomposisi biomasa yang lebih cepat meskipun pada temperatur pirolisis yang rendah. Hasilnya, besar densitas *char* dapat dilihat pada gambar 6, dengan besar densitas rata-rata sebesar 0,075 g/ml.



Gambar 7. Densitas *tar* hasil pirolisis pada temperatur pirolisis 250°C – 800°C

Densitas *tar*

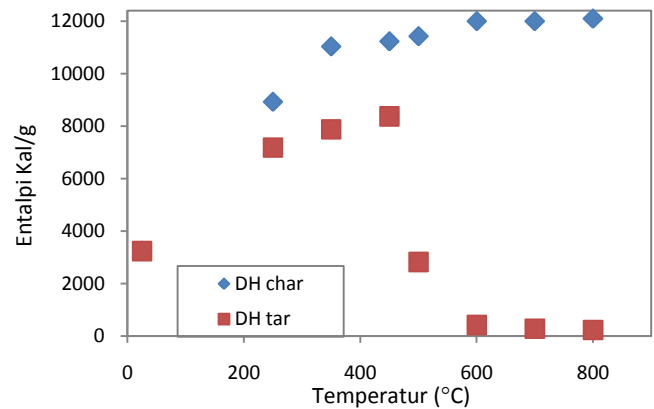
Pada produk *tar*, seperti digambarkan pada gambar 5, semakin tinggi temperatur pirolisis akan menyebabkan *massa* dan *volume* yang semakin besar. Namun, besarnya masa dan volume *tar* yang terjadi

mempunyai perbandingan yang berbeda, yang dinyatakan dengan densitas yang digambarkan pada gambar 6. Pada temperatur antara 250°C dan 500°C, terjadi kenaikan densitas yang sangat signifikan. Pada temperatur pirolisis 500°C dan 700°C, terjadi penurunan densitas yang sangat besar. Namun, pada temperatur 800°C, terjadi penurunan densitas yang sangat signifikan. Dimana semakin besar temperatur pirolisis menyebabkan perbandingan *massa* dan volume yang besar. Hal ini kemungkinan disebabkan semakin cairnya *tar* pada suhu pirolisis yang tinggi. Namun, pada suhu 800°C terjadi anomali, dimana terjadi kenaikan densitas yang sangat signifikan. Hal ini perlu diteliti lagi untuk mengetahui apa penyebabnya karena hal ini akan terkait dengan proses pembentukan gas yang terjadi.

Secara umum, pada temperatur pirolisis yang rendah, meskipun penurunan massa sudah terjadi secara signifikan, namun penurunan volume tidak sebesar penurunan *massanya*. Untuk *char*, kondisi struktur atom-atom *char* sangat berongga dan mempunyai perbandingan yang sama. Untuk *tar*, densitas yang rendah menunjukkan kondisi *tar* yang bersifat *light-oil*. Namun, besarnya rongga antar molekul dan rongga antar partikel biomassa masih harus diteliti lagi.

Efek temperatur pada perolehan nilai entalpi proses pirolisis pada kayu mahoni

Nilai entalpi menunjukkan potensi energi pada kandungan produk pirolisis dimana produk *char* merupakan bahan bakar padat dan produk *tar* adalah bahan baku *bio-oil*. Pada tiap- tiap temperatur pirolisis, produk yang dihasilkan diuji nilai entalpinya dengan menggunakan *bomb calorimeter*. Hasil penelitian yang berupa nilai entalpi untuk masing-masing produk dapat dilihat pada gambar 8. Untuk produk *char*, dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar temperatur pirolisis, maka semakin besar pula nilai entalpinya. Hal ini dikarenakan semakin tinggi pemanasan, maka semakin banyak pula *pure-char* yang terbentuk. Artinya, pada suhu yang rendah, produk padat tidak hanya berupa *char* saja, namun campuran antara kayu (masih ada) dan *char*. Semakin tinggi suhu pemanasan, maka akan semakin banyak kayu yang terdekomposisi untuk menjadi *char*. Kecenderungan yang sama terjadi pada pembentukan *tar* dimana semakin tinggi temperatur pirolisis maka semakin besar nilai kalor dari *tar* hasil pirolisis.



Gambar 8. Nilai entalpi (DH) *char* dan *tar* hasil pirolisis pada temperatur pirolisis 250°C – 800°C

Namun, mulai suhu 500°C, terjadi penurunan nilai kalor yang sangat signifikan. Hal ini berhubungan dengan penurunan densitas yang terjadi, dimana unsur-unsur yang mempunyai nilai kalor tinggi, seperti CH_4 dan H_2 mulai terdekomposisi menjadi fase gas. Akibatnya, nilai kalor *tar* menjadi rendah, dan diprediksi bahwa nilai kalor gas akan meningkat.

Secara umum, nilai entalpi pada *char* meningkat sebanding dengan peningkatan temperatur pirolisis, sedangkan *tar* mengalami kenaikan hingga suhu 500°C, tetapi mengalami penurunan pada suhu yang tinggi karena sifatnya yang berwujud cair semakin menjadi *light-oil*. Atau dapat dikatakan bahwa nilai entalpi *tar* meningkat hingga suhu 500°C. Setelah itu, nilai entalpi *tar* menurun dengan signifikan karena kekentalannya yang semakin menurun akibat senyawa-senyawa *combustible* berubah menjadi gas.

KESIMPULAN

Penelitian yang ditujukan untuk memperoleh nilai entalpi *char* dan *tar* hasil pirolisis ini dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Temperatur sangat berpengaruh terhadap perolehan nilai entalpi yang juga dipengaruhi oleh *massa*, volume, dan besarnya densitas yang terbentuk.
2. Pada temperatur yang tinggi diperoleh *massa char* yang kecil namun diiringi dengan peningkatan *tar*.
3. Nilai entalpi *char* meningkat seiring dengan kenaikan temperatur, sedangkan nilai entalpi *tar* meningkat hingga suhu 500°C. Setelah itu, nilai entalpi *tar* menurun dengan signifikan karena kekentalannya yang semakin menurun akibat senyawa-senyawa *combustible* berubah menjadi gas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Di Blasi, C., 2008, *Modeling Chemical and Physical Processes of Wood and Biomass Pyrolysis*, Progress in Energy and Combustion Science 34, pp. 47–99.
- [2] Koufopoulos, et al, 1991, *Modelling of the pyrolysis of biomass particles. Studies on kinetics, thermal and*

heat transfer effects, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Volume 69, Issue 4, pages 907–915.

- [3] Babu, B.V., et al, 2004, *Heat transfer and kinetics in the pyrolysis of shrinking biomass particle*, Chemical Engineering Science, Volume 59, Issue 10, May 2004, Pages 1999–2012
- [4] Tanoue, K., T. Hinauchi, T. Oo, T. Nishimura, M. Taniguchi, and K. Sasauchi, 2007, *Modeling of heterogeneous chemical reactions caused in pyrolysis of biomass particles*, Advanced Powder Technology 18, 825-840.
- [5] Tanoue K., Widya W., et al, 2009, *Numerical Simulation of Heat Transfer through the Pyrolysis of Woody Biomass*, 9AICHE - 2009 AIChE Annual Meeting, Conference
- [6] Tanoue, K., Widya, W., Yamasaki, K., Kawanaka, T., Yoshida, A., Nishimura, T., Taniguchi, M., Sasauchi, K., 2010, *Numerical Simulation of the thermal conduction of packed bed of woody biomass particles accompanying volume reduction induced by pyrolysis*, J. Jpn. Inst. Energy, 89 (10), 948.
- [7] Tanoue K., Widya W., et al, 2010, *Effect of the Volume Reduction On the Thermal Conduction Through the Pyrolysis of the Biomass*, 10AICHE - 2010 AIChE Annual Meeting, Conference Proceedings
- [8] Widya W, Tanoue, K., et al, 2011, *Rule of thumb for simulating biomass pyrolysis in packed bed reactor*, 11AICHE - 2011 AIChE Annual Meeting, Conference Proceedings
- [9] Mohan et al.; 2005: Pyrolysis of wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review; Department of Chemistry, Mississippi State University, USA.
- [10] Y.S Kim et al., 2003, J. anal. Appl. Pyrolysis 70 (2003)
- [11] Widya W., Mega S., 2012, *Reduksi Volume Dan Pengurangan Kotoran Sapi Dengan Metode Pirolisis*, Jurnal Rekayasa Mesin Vol.3, No. 2 Tahun 2012:343-349. ISSN 0216-468X
- [12] Widya W., Mega S., Meidiana C., Yuliati L., *Metode Pirolisis Untuk Penanganan Sampah Perkotaan Sebagai Penghasil Bahan Bakar Alternatif*, Jurnal Rekayasa Mesin, 2013 (in print)